

УДК 550.8.053:519.2

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОЧАСТОТНЫХ АЛГОРИТМОВ ПРОСЛЕЖИВАНИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИНАХ

А.И. Кочегуров, Е.А. Кочегурова

Томский политехнический университет

E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru

Проводится анализ применения фазочастотных алгоритмов отслеживания акустических сигналов для измерения уровня жидкости в нефтедобывающих скважинах. Путем статистического моделирования показано, что использование фазочастотных алгоритмов на этапе определения временного положения многоимпульсных сигналов позволяет получать надежные оценки уровня жидкости в условиях интенсивных помех.

Ключевые слова:

Измерение уровня жидкости, многоимпульсные сигналы, фазочастотные характеристики, функции группового запаздывания, функция правдоподобия.

Key words:

Measurement of level of a liquid, multipulse signals, phase-frequency characteristic, functions of group delay, likelihood function.

Эксплуатация нефтяных добывающих скважин, как и разработка нефтяных месторождений в целом, невозможна без постоянного и достоверного мониторинга. Одной из основных задач геолого-промысловых и гидродинамических исследований является контроль уровня жидкости в межтрубном пространстве скважин, так как данный параметр служит для расчета забойного давления и является важнейшим параметром работы насосного оборудования.

Для измерения уровня жидкости в скважинах, как правило, применяются методы эхометрирования моноимпульсными (одиночными) сигналами. В этих методах существует одна принципиальная проблема — крайне ненадежная оценка временного положения отраженного от уровня жидкости сигнала на эхограммах при наличии помех. В то же время на зондирующий сигнал действует большое количество мешающих факторов, осложняющих его распознавание: акустический шум насоса, вибрации колонны насосно-компрессорных труб (НКТ), переотражение самого зондирующего сигнала от неоднородностей в скважине. Все это приводит к тому, что во многих случаях энергии импульса становится недостаточно, и он полностью маскируется шумами.

Одним из перспективных направлений увеличения точности и надежности определения уровня жидкости в межтрубном пространстве нефтедобывающей скважины является разработка новых методов и средств зондирования скважин на основе формирования более мощных энергетических посылок, а также применения более эффективных алгоритмов для оценки времени регистрации отраженных сигналов [1].

В [2, 3] предложена система эхометрирования нефтедобывающих скважин на основе многоимпульсного зондирующего сигнала с последующей оценкой его временного положения фазочастотными методами, применение которой позволяет добиться существенного увеличения соотношения

сигнал/шум на эхограммах. В основу разработки положены следующие рассуждения.

Поскольку соотношение сигнал/шум при эхометрировании скважины определяется формулой

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\max} \cong \frac{\Delta p^2 T}{N_0},$$

где Δp — перепад давления при формировании зондирующего сигнала; N_0 — спектральная плотность мощности шума; T — длительность зондирующего сигнала, то при моноимпульсном зондировании скважин улучшить соотношение сигнал/шум можно двумя путями:

- 1) повышением перепада давления при формировании зондирующего сигнала;
- 2) увеличением длительности зондирующего сигнала.

Увеличение длительности зондирующего сигнала является наиболее продуктивным способом повышения соотношения сигнал/шум, поскольку:

- не зависит от условий эксплуатации конкретной скважины (давление, уровень шумов в погружном скважинном насосе, наличие газобаллонного оборудования);
- технически легко реализуем.

Однако, увеличение длительности зондирующего сигнала ведет к снижению точности измерения временной задержки, так как обнаружение протяженного импульса связано с большим временем интегрирования. Время интегрирования является областью неопределенности в установлении величины задержки и в конечном итоге приводит к снижению надежности определения уровня жидкости в скважине.

В этой связи в работе предлагается использовать протяженный сложный сигнал (сигнал с каким-либо видом внутриимпульсной модуляции) и его последующим сжатием. В качестве такого сигнала выбрана посылка в виде пачки импульсов с временной модуляцией. Данный подход может обеспечить высокое соотношение сигнал/шум при

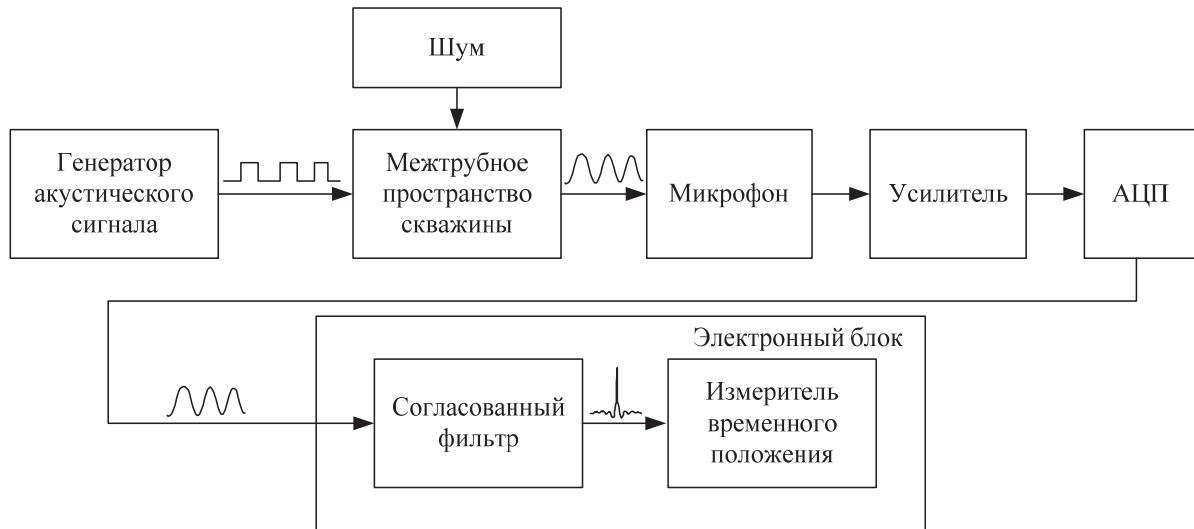


Рис. 1. Информационная система многоимпульсного зондирования

сохранении необходимой точности измерения временной задержки.

Тогда технология зондирования скважин многоимпульсными сигналами будет отличаться от традиционного (моноимпульсного) метода тем, что в течение одного измерения уровень, закрепленный на устье скважины, генерирует не один, а серию импульсов одинаковой формы, но с различным временем задержки между импульсами. Далее сгенерированная пачка импульсов приходит по межтрубному пространству, отражается от уровня жидкости и возвращается к устью скважины, где регистрируется, оцифровывается, подвергается согласованной фильтрации, а затем производится измерение временного положения отраженного сигнала фазочастотными методами [3].

На рис. 1 приведена информационная система определения уровня жидкости в нефтедобывающих скважинах при использовании многоимпульсного зондирования.

Математическая модель эхограммы, формируемой системой многоимпульсного зондирования, имеет следующий вид

$$x(t) = \sum_{i=1}^k S_i(t - \tau_i) + N(t), \quad (1)$$

где $S_i(t - \tau_i)$ – i -й отраженный импульс

$$S(t - \tau) = -\frac{M}{\sqrt{2\pi}D} \exp\left[-\frac{(t - \tau)^2}{2D^2}\right];$$

D – параметр ширины импульса; τ_i – временное положение импульса в многоимпульсной посылке; M – масштабный коэффициент; $N(t)$ – аддитивный нерегулярный шум, распределенный по закону Гаусса; k – количество импульсов в посылке.

Далее, в соответствии с представленной системой многоимпульсного зондирования (рис. 1), регистрируемая сумма отражений подвергается согласованной фильтрации

$$\hat{X}(t) = x(t) \otimes h(t),$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика согласованного фильтра; \otimes – круговая свертка.

Измерение временного положения акустических сигналов на выходе согласованного фильтра осуществлялось путем анализа фазочастотных характеристик (ФЧХ) и функций группового запаздывания (ФГЗ) регистрируемых участков эхограмм [4]. Использование для оценки временного положения сигналов наряду с ФЧХ функций группового запаздывания объясняется тем, что в затрубном пространстве скважин наблюдается волновая дисперсия, которая искажает форму сигнала на регистрируемых эхограммах. В этом случае методы оценки временного положения сигналов путем выделения максимума огибающей на основе расчета ФГЗ оказываются весьма эффективными [5]. Поскольку полоса частот, в которой сосредоточена основная энергия сигналов, составляла 10...15 Гц, оптимальные оценки временного положения сигнала оценивались по выборкам ФЧХ и ФГЗ в предположении наличия корреляции между элементами выборок. В этом случае для оценки временного положения сигналов можно использовать максимизацию функций правдоподобия вида [4]:

а) для фазы

$$\ln L(\tau) = \sum_{k=1}^m \cos(\Delta\varphi(\omega_k) - \omega_k \tau), \quad (2)$$

где $\Delta\varphi(\omega_k) = \varphi_k(\omega_k) - \varphi_s(\omega_k)$ – отклонение ФЧХ сигнала от ФЧХ смеси;

б) для групповой задержки

$$\ln I(\tau) = \sum_{k=1}^m \cos(\Delta\omega(\Delta t_{\text{гп}} \omega_k - \tau)), \quad (3)$$

где $\Delta t_{\text{гп}}(\omega_k) = t_{\text{гп}}^x(\omega_k) - t_{\text{гп}}^s(\omega_k)$ – отклонение ФГЗ сигнала от ФГЗ смеси.

Экспериментальные исследования эффективности предлагаемой системы многоимпульсного

зондирования скважин (рис. 1) проводились на модели эхограммы (1) путем статистического моделирования в математическом пакете Matcad [6]. В качестве примера на рис. 2 показана модель эхограммы длительностью 17 с при отсутствии шума, а на рис. 3 при его наличии.

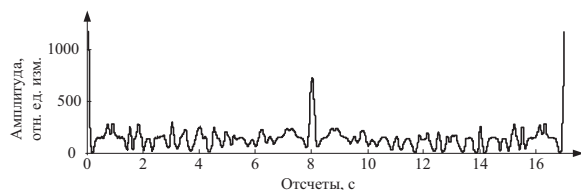


Рис. 2. Модель эхограммы многоимпульсного зондирующего сигнала

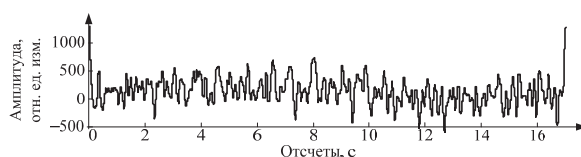


Рис. 3. Модель эхограммы многоимпульсного зондирующего сигнала при наложении шума (соотношение сигнал/шум $\rho=1$)

Из рис. 2 видно, что пик амплитуды сигнала четко просматривается на восьмой секунде. Спектральные характеристики отраженного сигнала представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

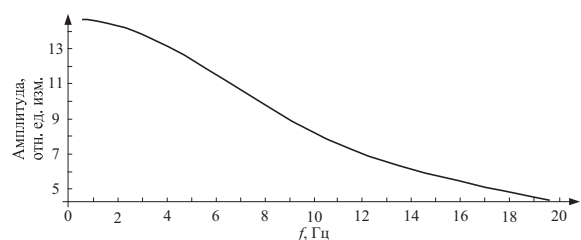


Рис. 4. График АЧХ многоимпульсного сигнала

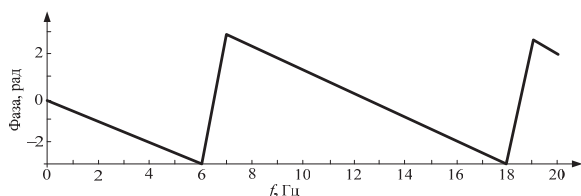


Рис. 5. График ФЧХ многоимпульсного сигнала

Из результатов расчетов видно, что отраженный сигнал на эхограмме представляет собой низкочастотный сигнал, основная энергия которого сосредоточена в диапазоне до 10 Гц. ФЧХ сигнала линейна в анализируемой полосе частот; наличие скачков связано с вычислительными аспектами, так как расчет ФЧХ производился на интервале от $-\pi$ до $+\pi$. Доопределение ФЧХ по всему интервалу не производилось, т. к. при формировании функций правдоподобия (2) и (3) вычисляются либо косинус ФЧХ, либо косинус ФГЗ. На рис. 6 и 7 в качестве иллюстрации представлены функция правдоподобия эхограммы многоимпульсного зон-

дирующего сигнала, построенная на основе анализа ФЧХ (5), и косинус ФЧХ.

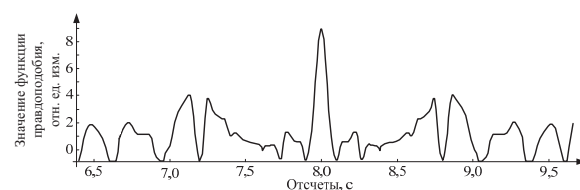


Рис. 6. График функции правдоподобия

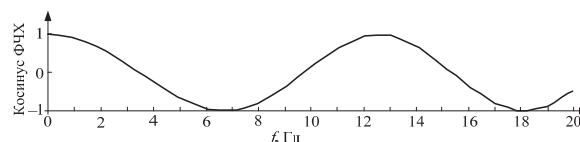


Рис. 7. График косинуса ФЧХ многоимпульсного сигнала

Из рис. 6 видно, что функция правдоподобия эхограммы многоимпульсного сигнала подобна по форме самой эхограмме, а ее максимум точно соответствует временному положению сигнала.

При наличии шумов (рис. 3) отражение на эхограмме не просматривается, и следовательно оценка его временного положения является неоднозначной. На рис. 8 представлена функция правдоподобия зашумленного сигнала на основе анализа его ФЧХ (5).

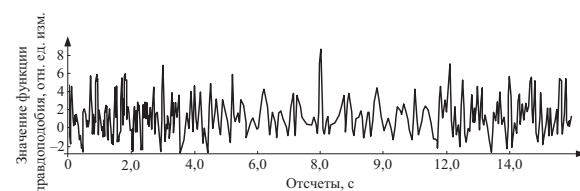


Рис. 8. График функции правдоподобия многоимпульсного сигнала при наличии шума

Из рис. 8 видно, что функция правдоподобия позволяет достаточно надежно выделить временное положение отражения на эхограмме при наличии шума, при этом пик амплитуды сигнала четко соответствует восьмой секунде.

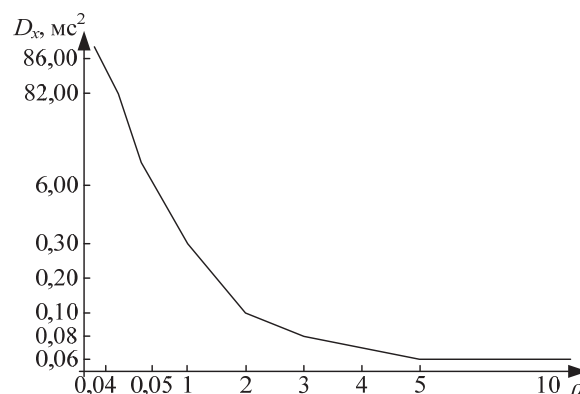


Рис. 9. Дисперсия оценки временного положения сигнала D_x в зависимости от соотношения сигнал/шум

Для оценки надежности определения временного положения сигнала на эхограмме при нали-

чий помех была сформирована выборка объемом 50 наблюдений, соотношение сигнал/шум оценивалось как соотношение квадрата пикового значения амплитуды сигнала к дисперсии шума. В таблице приведены значения отклонений оценки математического ожидания временного положения сигнала от его истинного значения и дисперсия оценок временного положения при различных соотношениях сигнал/шум, а на рис. 9 и 10 представлены соответствующие графики.

Таблица. Значения отклонений математического ожидания и дисперсии временного положения сигнала

Соотношение сигнал/шум	Ошибка смещения, мс	Доверительные интервалы математического ожидания	Дисперсия, мс ²	Доверительные интервалы дисперсии
10,000	0,453	(0,44; 0,46)	0,052	(0,040; 0,080)
5,000	0,456	(0,45; 0,47)	0,076	(0,050; 0,122)
4,000	0,486	(0,48; 0,50)	0,077	(0,060; 0,123)
3,000	0,509	(0,50; 0,52)	0,081	(0,060; 0,130)
2,000	0,516	(0,50; 0,52)	0,089	(0,060; 0,140)
1,000	1,119	(1,10; 1,14)	0,305	(0,220; 0,490)
0,500	4,340	(4,24; 4,44)	6,694	(4,800; 10,800)
0,063	5,270	(4,91; 5,63)	82,180	(58,900; 132,040)
0,043	5,714	(5,35; 6,08)	86,610	(62,100; 139,200)

Из результатов экспериментальных исследований, представленных в таблице и на рис. 9 и 10,

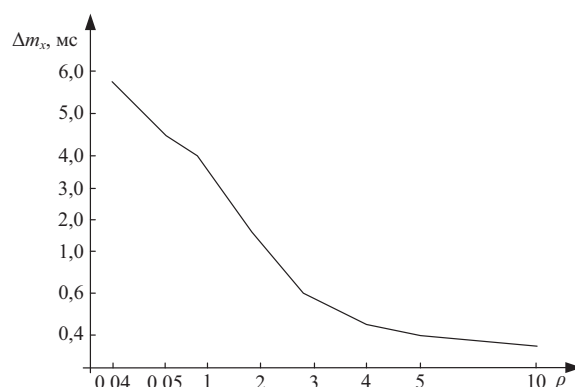


Рис. 10. Отклонение математического ожидания временного положения сигнала Δm_x в зависимости от соотношения сигнал/шум

следует, что предлагаемая система многоимпульсного зондирования скважин, включающая измерение временного положения отраженных акустических сигналов фазочастотными алгоритмами, обеспечивает значительно более высокую точность и надежность определения уровня жидкости в скважинах по сравнению с традиционными моноимпульсными системами. Такие выводы можно сделать на том основании, что даже при соотношениях на эхограммах сигнала к шуму, близких к единице, отклонение математического ожидания временного положения сигнала от истинного значения составляет порядка 3 мс, а дисперсия — 0,3 мс².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Налимов К.Г., Кочегуров А.И. Повышение точности оценок уровня жидкости в нефтедобывающих скважинах // Актуальные проблемы современной науки. Химия нефти и ее переработка: Матер. II Междунар. форума — Самара, 2006. — № 14. — С. 30–34.
2. Налимов К.Г. Определение уровня жидкости в затрубном пространстве скважин методом эхометрирования с зондированием многоимпульсными сигналами // Нефтяное хозяйство. — 2006. — № 4. — С. 112–114.
3. Налимов К.Г., Кочегуров А.И. Определение уровня жидкости в межтрубном пространстве нефтедобывающих скважин методом эхометрирования // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VIII Междунар. симп. им. академика М.А. Усова 2004 г. — Томск, 2004. — С. 552–553.
4. Кочегуров А.И. Анализ алгоритмов измерения временного положения сложных сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Проблемы информатики. — 2011. — № 2 (10). — С. 44–50.
5. Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по функциям их групповой задержки // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315. — № 5. — С. 45–48.
6. Кочегуров А.И., Кочегурова Е.А. Технология обучения решению инженерно-экономических задач в математическом пакете Matlab // Современное образование: массовость и качество: Тез. докл. Регион. научно-техн. конф. — Томск: ТУСУР, 2001. — С. 93–94.

Поступила 03.11.2011 г.